

論文の内容の要旨

論文題目	Experimental and computational study of the aerodynamic characteristics of archery arrows アーチェリー矢の空力特性に関する実験および数値計算的研究
学 位 申 請 者	Ortiz Enriquez Julio Cesar オルティス エンリケス フリオ セサル

本論文では、アーチェリー矢の空力特性が実験と数値シミュレーションによって調べられ、鏃、シャフトそして矢羽の様々な組合せが空力特性に及ぼす影響が解明されている。

スポーツ競技は空気や水といった流体中で行われるために、必ずその影響を受ける。特に精度が要求される標的競技では流体力学的な要因の重要度が高い。アーチェリー矢は4つのパーツ（鏃、シャフト、矢羽、矢筈）から構成され、空気抵抗や揚力は主にシャフトと矢羽に働く。一方、鏃形状はシャフト側面の境界層流れの状態に影響する重要な要因となる。従来の風洞実験や水槽実験における空力特性の計測精度は不十分で、新たな実験手法の導入が必要となる。

本論文では、磁力支持天秤装置付き風洞実験（MSBS風洞実験：JAXA）と、屋内アーチェリー場（JISS屋内陸上競技実験場、江戸川区総合体育館）における飛翔実験が提案されている。MSBS風洞実験では磁力によって矢を浮遊させ、支持具干渉のない高精度な空力特性の測定が可能となる。飛翔実験では圧縮空気を用いて矢を放つことで、たわみ振動のない矢の飛翔を広い速度領域で実現する。また、加速度センサをシャフト内に挿入して、矢に働く空気力の時間変化を計測している。同時に、複数の高速度ビデオカメラによって矢の飛翔状態を撮影して、その画像から矢の減速率を解析している。

MSBS風洞実験からは、抗力（ C_D ）・揚力（ C_L ）・ピッチングモーメント（ C_M ）係数の迎角依存性や、抗力係数（ C_D ）のRe数依存性が求められる。レイノルズ数 $Re=1.2 \times 10^4$ での C_D は、椎型の競技用鏃と直線状の小矢羽をつけた場合には1.56であり、大矢羽の場合は2.05となる。一方、 C_M が表す矢羽の安定化効果は大矢羽の場合が大きくなる。気流に平行なA/C/E矢の側面境界層流れが測定領域（ $0.8 \times 10^4 < Re < 1.3 \times 10^4$ ）で層流状態を保つのに対して、迎角を 0.75° つけると $Re=1.1 \times 10^4$ 付近で乱流遷移が発生して C_D が増大する。

飛翔実験では、迎角を制御しきれないため、 $1.3 \times 10^4 < Re < 1.8 \times 10^4$ が乱流遷移領域となり、測定された C_D 値の標準偏差が大きくなる。一方、乱流値となる $Re > 1.9 \times 10^4$ では標準偏差が小さい。また、加速度センサで計測された減速率の時間変化は、乱流状態と層流状態が瞬間的に入れ替わることを示す。椎型鏃と小矢羽をつけた場合、 $Re = 1.8 \times 10^4$ では、矢側面の境界層流れが乱流状態から層流状態へ戻ることを示す減速率の減少が見られる。鏃形状を流線形にすると、より高いレイノルズ数領域まで、層流境界層が形成される。MSBS風洞実験と飛翔実験にの両者に共通する Re 数領域では、 C_D の計測結果の整合性が確認される。

次に、実験的に得られた空力特性を反映した矢の飛翔軌道と飛翔姿勢の数値計算が実行されている。そして、シャフトや矢羽の選択がもたらす差異が吟味されるとともに、矢の発射時の初期条件、特に矢の初期角速度が迎角の時間変化に大きな影響を与えることが指摘されている。理想的な回転角速度で放たれた矢にはほとんど迎角がつかず、境界層が層流状態になることが分かる。

さらに、背景風の下での矢の飛翔軌道と飛翔姿勢の計算結果から、様々な背景風（一様、非一様、東京オリンピック競技会場における疑似的風系）が競技結果へ及ぼす影響が詳しく議論されている。矢速が速く、質量が大きく、抗力係数 C_D の小さい矢は背景風の影響を受けにくくなる。実際、矢のシャフト側面の境界層流れが層流状態であれば、乱流状態の場合に比べて C_D が半減するために、背景風による的ずれが45%軽減されることが示された。

本論文では、矢のシャフト側面の境界層流れの状態がアーチェリー矢の飛翔に大きな影響を与えることが示されており、境界層流れの乱流遷移機構の解明と制御という流体力学的な研究を進めることが、アーチェリー競技者の競技力の向上に資すると指摘されている。

論文審査の結果の要旨

学位申請者氏名 Ortiz Enriquez Julio Cesar

審査委員主査 宮寄 武

委員 大川 富雄

委員 千葉 一永

委員 Matuttis Hans-Georg

委員 守 裕也

本論文では、アーチェリー矢の空力特性が2種類の実験（MSBS風洞実験と飛翔実験）によって計測され、その結果に基づいて運動方程式を数値積分することで、アーチェリー矢の飛翔軌道と飛翔姿勢が求められている。そして背景風が野外アーチェリー競技に及ぼす影響が詳しく調べられている。論文の構成は以下の通りである。

第1章では、本研究の背景及び目的が述べられている。スポーツ競技における流体力学的な要因の重要性が指摘され、それを調べるための研究手法が示されている。

第2章では、本研究で扱うアーチェリー矢の具体的な構成（鏃、シャフト、矢羽、矢筈）とその物理的な特性が説明されている。

第3章では、磁力支持天秤装置付き風洞実験（MSBS風洞実験：JAXA）と、屋内アーチェリー場（JISS屋内陸上競技実験場、江戸川区総合体育館）における飛翔実験の詳細が説明されている。MSBS風洞実験では磁力によって矢を浮遊させ、支持具干渉のない高精度な空力特性の測定が可能となる。飛翔実験では圧縮空気を用いて矢を放つことで、たわみ振動のない矢の飛翔を実現する。また加速度センサをシャフト内に挿入して、矢に働く空気力の時間変化を計測している。

第4章では、矢の飛翔軌道と飛翔姿勢の時間変化を記述する運動方程式が示される。矢は剛体としてモデル化され、矢羽の姿勢安定効果のために迎角が小さく、揚力係数とピッチングモーメント係数が迎角に比例すると仮定されている。

第5章では、第3章で紹介された実験による空力特性の測定結果が述べられている。MSBS風洞実験からは、抗力（ C_D ）・揚力（ C_L ）・ピッチングモーメント（ C_M ）

係数の迎角依存性や、抗力係数 (C_D) の Re 数依存性が求められる。気流に平行な A/C/E 矢の側面境界層流れが測定範囲 ($0.8 \times 10^4 < Re < 1.3 \times 10^4$) で層流状態を保つものに対して、迎角を 0.75° つけると $Re = 1.1 \times 10^4$ 付近で乱流遷移が発生して C_D が増大する。迎角を制御しきれない飛翔実験では、 $1.3 \times 10^4 < Re < 1.8 \times 10^4$ が乱流遷移領域であり、測定された C_D 値の標準偏差が大きくなるが、 $Re > 1.9 \times 10^4$ では乱流値となる。また、加速度センサで計測された減速率の時間変化は、乱流と層流状態が瞬間的に入れ替わることを示す。

第6章では、矢の飛翔軌道と飛翔姿勢の数値計算結果が与えられ、シャフトや矢羽の選択がもたらす差異が吟味されている。矢の発射時の初期条件、特に矢の初期角速度が迎角の時間変化に大きな影響を与えることが指摘されている。一方、背景風の下での矢の飛翔軌道と飛翔姿勢の計算結果から、様々な背景風（一様、非一様、東京オリンピック競技会場における疑似的風系）が競技結果へ及ぼす影響が議論されている。

第7章は、本論文のまとめであり、矢側面境界層の状態がアーチェリー矢の飛翔に大きな影響を与えることを示している。この乱流遷移機構の詳細を解明して、制御することは今後の研究課題とされている。

本論文では、独自に提案された MSBS 風洞実験と飛翔実験によってアーチェリー矢の空力特性が精密に計測され、その結果に基づいて矢の飛翔軌道と飛翔姿勢が数値計算されている。アーチェリー競技が矢のシャフト側面の境界層流れの乱流遷移領域で行われていることを指摘し、鏃・シャフト・矢羽の選択や初期角速度の設定によって、乱流遷移過程を制御することが競技力の向上につながることを示唆している。各章における記述は明快であり、結論に至る議論の展開にも高い合理性が認められる。

以上、アーチェリー矢の飛翔に伴う流体现象についての独創的な研究内容を含む本論文は、流体力学ばかりでなくスポーツ工学への貢献が顕著である。審査委員全員が博士（工学）の学位論文として十分な価値を有するものと判定した。